

**DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE PARCHES DE RETAMO
ESPINOSO (*Ulex europeus*) EN LOS CERROS ORIENTALES DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ, USANDO
IMÁGENES SATELITALES SENTINEL-2**



AUTOR

ERWIN MAURICIO BARRETO VACA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

ESPECIALISTA EN GEOMÁTICA

Director:

Ing. Freddy León Reyes M.Ed

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA

BOGOTÁ, NOVIEMBRE 2020



DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE PARCHES DE RETAMO ESPINOSO (*Ulex europeus*) EN LOS CERROS ORIENTALES DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ, USANDO IMÁGENES SATELITALES SENTINEL-2

**DEVELOPMENT OF A SPECTRAL SIGNATURE FOR THE
IDENTIFICATION OF RETAMO ESPINOSO (*Ulex europeus*)
PATCHES IN THE ORIENTAL HILLS OF THE BOGOTA CITY,
USING SENTINEL-2 SATELLITE IMAGES.**

Erwin Mauricio Barreto Vaca
Código: 3101508
Ingeniero Forestal

Director:
Ing. Freddy León Reyes M.Ed

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA
NOVIEMBRE DE 2020
BOGOTÁ-COLOMBIA**

DESARROLLO DE UNA FIRMA ESPECTRAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DE PARCHES DE RETAMO ESPINOSO (*Ulex europeus*) EN LOS CERROS ORIENTALES DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ, USANDO IMÁGENES SATELITALES SENTINEL-2

DEVELOPMENT OF A SPECTRAL SIGNATURE FOR THE IDENTIFICATION OF RETAMO ESPINOSO (*Ulex europeus*) PATCHES IN THE ORIENTAL HILLS OF THE BOGOTA CITY, USING SENTINEL-2 SATELLITE IMAGES.

Erwin Mauricio Barreto Vaca
Ingeniero Forestal.
Estudiante Facultad de Ingeniería
Universidad Militar Nueva Granada.
Bogotá, Colombia
u3101508@unimilitar.edu.co

RESUMEN

En el presente documento podemos encontrar la metodología y resultados alcanzados en el desarrollo de una firma espectral que permite realizar una aproximación a la identificación de parches de Retamo espinoso (*Ulex europeus*) presentes en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá, haciendo uso de las imágenes multiespectrales de adquisición gratuita como los son las proporcionadas por la misión Copernicus Sentinel-2 de la European Space Agency – ESA, las cuales a la fecha de elaboración de este estudio son las que cuentan con la mejor resolución espacial. Adicionalmente para el procesamiento de las imágenes multiespectrales, el desarrollo de la firma espectral y la clasificación de las coberturas asociadas a los parches de retamo espinoso se usa como herramienta el software de licencia libre Quantum GIS – QGIS, el cual por medio del complemento Semi-Automatic Classification, se lograron alcanzar los objetivos propuestos.

Palabras Clave: Retamo espinoso, *Ulex europeus*, firma espectral, Sentinel 2 Quantum GIS, QGIS, Semi-Automatic Classification plugin, cerros orientales, Bogotá.

ABSTRACT

In this document we can find the methodology and results achieved in the development of a spectral signature that allows an approximation to the identification of Retamo espinoso (*Ulex europeus*) patches, present in the eastern hills of the Bogotá city,

making use of multispectral images free as are those provided by the Copernicus Sentinel-2 mission of the European Space Agency - ESA, which at the date of preparation of this study are those with the best spatial resolution. Additionally, for the processing of multispectral images, the development of the spectral signature and the classification of the covers associated with the Retamo espinoso patches, is used the free license software Quantum GIS - QGIS as a tool, which through the Semi-Automatic Classification complement, the proposed objectives were achieved.

Keywords: Retamo espinoso, *Ulex europeus*, spectral signature, Sentinel 2, Quantum GIS, QGIS, Semi-Automatic Classification plugin, eastern hills, Bogotá.

INTRODUCCIÓN

La teledetección o percepción remota es la técnica para obtener información a distancia de objetos sin que exista un contacto material, y que se ha convertido en las últimas décadas en una herramienta indispensable para comprender y mejorar la toma de decisiones del entorno general en el que vivimos. Actualmente son muchos los campos de acción en los que la teledetección es aplicada, desde poder realizar cartografía de precisión, pasando por gestionar de una manera eficiente nuestros recursos naturales, hasta conocer un poco más del universo que nos rodea.

Las plataformas de teledetección más utilizada en cuanto a la captura de imágenes de la superficie terrestre se refieren son las satélites o las plataformas aéreas (aviones, helicópteros o vehículos aéreos no tripulados), siendo la de satélites la que nos ofrece a modo general más ventajas, ya que en la actualidad cuentan con una cobertura global, multiescala, multiespectral y multitemporal.

A modo general existen dos tipos de sensores para la captura de información mediante percepción remota, los sensores pasivos y los sensores activos. Los sensores pasivos son aquellos que usan la radiación emitida por el sol y nos permite clasificar los objetos según sus niveles de absorción o reflectancia de las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. Por otra parte, los sensores activos son aquellos que están equipados con una fuente emisora de radiación en una o varias longitudes de onda específicas, y a su vez cuenta con el sensor que captura la información reflejada por los objetos, un ejemplo de esta tecnología son las imágenes de radar.

Para comprender como funciona la captura de información de los sensores a bordo de los satélites, en primera instancia debemos entender en que consiste el denominado Espectro Electromagnético, ya que es la base de la recepción remota. El ojo humano se puede considerar como un sensor remoto, puesto que nos permite interpretar nuestro entorno con base a la luz reflejada o emitida por los objetos. Sin embargo, solo podemos percibir un pequeño rango del espectro que denominamos "luz visible", el cual es solo una de las muchas formas de radiación electromagnética que existen. En teledetección, lo normal es caracterizar a las ondas electromagnéticas por su longitud de onda en micrómetros (μm , 10 m) o nanómetros (nm, 10 m), es decir, por la posición que ocupan dentro del espectro electromagnético (Labrador García, Évora Brondo, & Arbelo Pérez, 2012).

El espectro visible (VIS) es una pequeña región del espectro electromagnético que abarca desde los 0.4 μm a los 0.7 μm . El color azul iría desde 0.4 a los 0.5 μm , el verde desde 0.5 μm hasta los 0.6 μm y el rojo de 0.6 μm a los 0.7 μm . Por encima del rojo se sitúa la región infrarroja (IR), que a su vez está dividida en tres categorías: IR próximo (NIR) (0.7 – 1.3 μm), IR medio (SWIR) (1.3 – 3 μm) e IR térmico (TIR) (3 – 100 μm). La energía ultravioleta (UV) se encuentra inmediatamente por debajo del color azul. La porción de microondas se encuentra más allá del IR, a longitudes de onda mucho más grandes (1 mm – 1 m), las cuales son las longitudes de onda más largas usadas en teledetección. De éstas, las más cortas tienen propiedades similares al IR térmico, mientras que las restantes son similares a las usadas en comunicaciones. (Labrador García, Évora Brondo, & Arbelo Pérez, 2012)

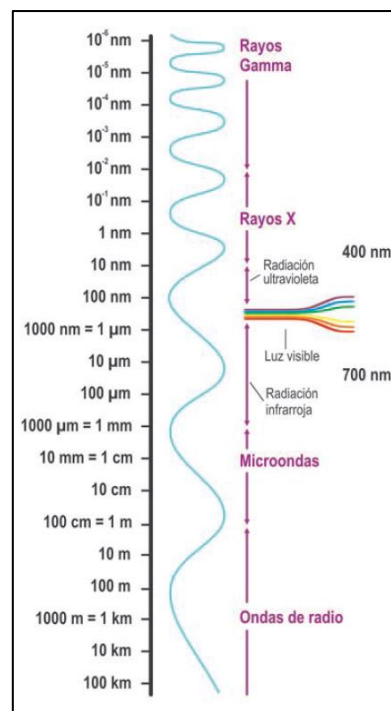


Figura1. Espectro Electromagnético

Fuente: tomado de (Labrador García, Évora Brondo, & Arbelo Pérez, 2012)

Aclarado en que consiste el espectro electromagnético ahora se debe tener caridad sobre el segundo eje fundamental de la teledetección, el cuales la reflectancia de las superficies de los objetos. Este concepto se define a modo general como la porción de energía incidente que es reflejada por una superficie, medida como una magnitud adimensional que puede tomar valores entre 0 y 1 o porcentajes entre 0 y 100%, que varía en función de la longitud de onda y el tipo de superficie de un objeto específico. (Labrador García, Évora Brondo, & Arbelo Pérez, 2012).

Para este caso específico, donde el objeto de estudio es una especie vegetal, su comportamiento espectral, es decir, la cantidad de energía reflectante medida en cada individuo o planta a lo largo del espectro depende de la naturaleza de esta misma, de sus interacciones con factores climáticos como la radiación solar, de la disposición de nutrientes y agua, su estado fitosanitario y en muchos casos el estado fenológico en el que se encuentra. Los factores más dominantes en los análisis de reflectancia en las hojas son: los pigmentos en las células mesofílicas retenedoras (clorofila, carotenos), células mesofílicas absorbedoras que controlan la reflexión y dispersión de energía en el infrarrojo, y cantidad de agua en la planta. (Ángel López, 2012)

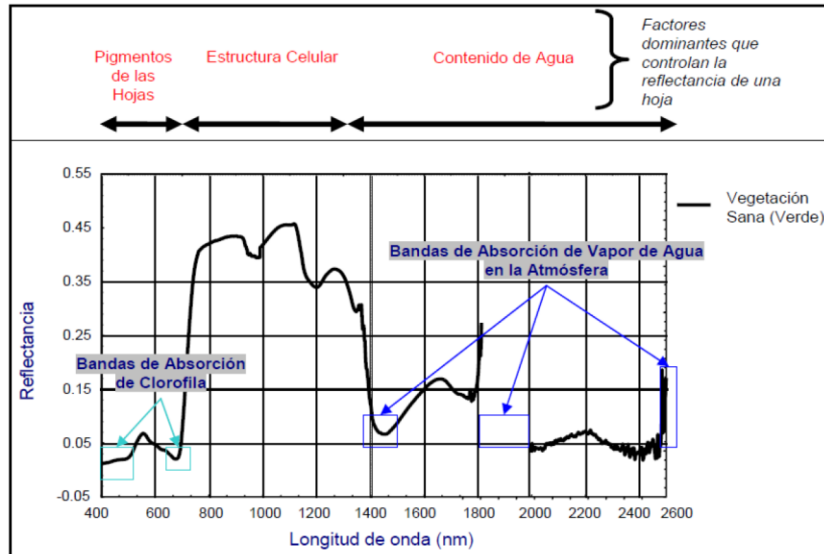


Figura 2. Comportamiento general de la firma espectral en la vegetación sana. Fuente: (Ángel López, 2012).

Al usar sensores remotos para la interpretación de las coberturas vegetales terrestres, los factores decisivos para la elección de que herramienta usar (Satélite, sensor), es el tamaño de nuestro objeto de estudio, la escala de detalle a la cual lo queremos estudiar y la temporalidad que el estudio requiere, lo cual está ligado a las cuatro tipos de resolución que manejan los equipos usados para teledetección, que son: La Resolución Espacial, que consiste en la distancia angular o lineal más pequeña que puede captar un sensor remoto de la superficie terrestre, y viene representada por un píxel, el cual es la unidad mínima que conforma una imagen digital; La Resolución Espectral, que se define como el intervalo a las longitudes de onda al que es sensible un sensor y a la cantidad de sensores con los que cuenta un equipo; La resolución Radiométrica, la cual se define como la cantidad mínima de energía que se requiere para incrementar el valor de un píxel en un nivel digital (ND); y finalmente la Resolución Temporal, la cual se entiende como el ciclo de repetición, o intervalo de tiempo, entre dos adquisiciones de imágenes sucesivas de una misma porción de la superficie. (Labrador García, Évora Brondo, & Arbelo Pérez, 2012).

En la actualidad, uno de los usos que se les están dando los sensores remotos es la identificación de especies vegetales que se consideran invasoras, las cuales pueden llegar a ser una amenaza para la biodiversidad de los ecosistemas. Este es el caso de la especie Retamo espinoso (*Ulex europeus*), la cual es originaria de la costa occidental de Europa y norte de África, y que actualmente es considerada una de las 100 especies invasoras más agresivas del mundo, la cual arribó al país en la década de 1950, ya que por sus características fenotípicas fue introducida como cerca viva en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá. (Ocampo Zuleta & Solorza Bejarano, 2017)

El Retamo espinoso se caracteriza por ser una especie con reproducción sexual y asexual, pionera de rápido crecimiento y alta capacidad de invasión, con producción,

longevidad, y porcentaje de germinación de las semillas alto, así como, rápido crecimiento y óptimo desarrollo, que se retroalimenta de forma positiva bajo disturbios asociados al fuego. (Ocampo Zuleta & Solorza Bejarano, 2017)

El presente estudio busca identificar los parches de retamo espinoso (*Ulex europaeus*) presentes en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá, a través del desarrollo de una firma espectral a partir de imágenes satelitales Sentinel-2, las cuales son las imágenes multiespectrales de mejor resolución espacial y de libre adquisición a la fecha.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de este estudio se buscó usar insumos y herramientas que contaran con licencias de libre acceso, con el objetivo de que los resultados alcanzados puedan ser replicados por cualquier persona sin que se tenga el obstáculo de la adquisición de licencias, por tal motivo se ha implementado Quantum GIS (Qgis), el cual es una aplicación profesional de Sistemas de Información Geográfica de Software Libre y de Código Abierto (FOSS), el cual proporciona una creciente gama de capacidades a través de sus funciones básicas y complementos, donde es posible visualizar, gestionar, editar y analizar datos, además de poder diseñar mapas imprimibles.

De igual manera se decidió usar como insumo las imágenes de la misión Copernicus Sentinel-2, dado que pueden ser descargadas de manera gratuita de la página de la European Space Agency – ESA (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), donde luego de realizar un pequeño registro logramos tener acceso ellas. Esta misión está compuesta por dos satélites colocados en órbita polar sincrónica con el sol, en faces de 180° entre sí. Con una amplia faja de 290 Km y un alto tiempo de revisión que en promedio es de 5 días en el ecuador y de 2 a 3 días en longitudes medias y que su uso principal es para apoyar el seguimiento de los cambios en la superficie de la tierra. Además, cuenta con 13 bandas que manejan resoluciones espaciales entre los 10 y los 60 metros y resoluciones espectrales entre los 0.43 μm a los 2.28 μm como se muestra en la Figura 3. se optó por el uso de las imágenes Sentinel-2 debido a que a la fecha son las que nos ofrecen de manera gratuita la mejor resolución espacial por lo menos en las bandas del visible y del infrarrojo Cercano NIR 1, las cuales permiten realizar análisis de la vegetación.

Bandas Sentinel-2	Longitud de Onda Central [micrómetros]	Resolución [metros]
Banda 1 - Coastal aerosol	0.443	60
Banda 2 - Azul	0.490	10
Banda 3 - Verde	0.560	10
Banda 4 - Rojo	0.665	10
Banda 5 - Vegetation Red Edge	0.705	20
Banda 6 - Vegetation Red Edge	0.740	20
Banda 7 - Vegetation Red Edge	0.783	20
Banda 8 - NIR	0.842	10
Banda 8A - Vegetation Red Edge	0.865	20
Banda 9 - Water vapour	0.945	60
Banda 10 - SWIR - Cirrus	1.375	60
Banda 11 - SWIR	1.610	20
Banda 12 - SWIR	2.190	20

Figura 3. Bandas del espectro Sentinel-2. Fuente: (Congedo, 2020)

DESCARGA DE PRODUCTOS SENTINEL-2

Fecha: Como se requería tomar puntos de control, en este aspecto se tomó un rango de 12 meses desde la fecha de inicio del estudio, para de esta manera evitar el posible cambio de cobertura en los lugares muestreados. El rango definido fue del 18 de Agosto del 2019 al 18 de agosto del 2020.

Plataforma Satelital: S2A *

Tipo de Producto: S2MSI1C

Cobertura de Nubes en %: 1.5

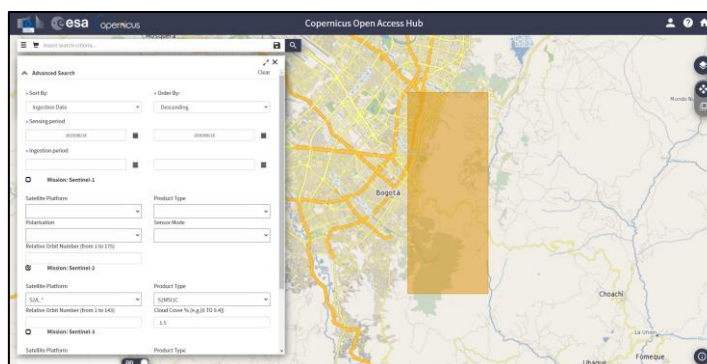


Figura 4. Descarga de productos Sentinel-2 desde la plataforma web Copernicus Open Access Hub

Al darle iniciar búsqueda nos arrojó 74 resultados, donde elegimos la imagen más reciente y con menor cantidad de nubes sobre nuestra zona de estudio, seleccionando así la imagen del 09 de enero del 2020:

S2A_MSIL1C_20200109T152631_N0208_R025_T18NXL_20200109T185317

La cual se procedió a validar si se encontraba en línea y a descargar.

USOS DEL COMPLEMENTO SEMI-AUTOMATIC CLASSIFICATION DE QGIS PARA GENERAR UNA IMAGEN MULTIESPECTRAL EN VALORES DE REFLECTANCIA PARA IMÁGENES SENTINEL-2.

Luego de obtener la imagen multispectral, se verifico que se encontrara descargado y activado el complemento Semi-Automatic Classification de QGIS. Una vez activado este complemento se procedió a realizar la corrección atmosférica DOS1 de todas las bandas, y a realizar la conversión de Niveles Digitales (ND) a Valores de Reflectancia (RT).

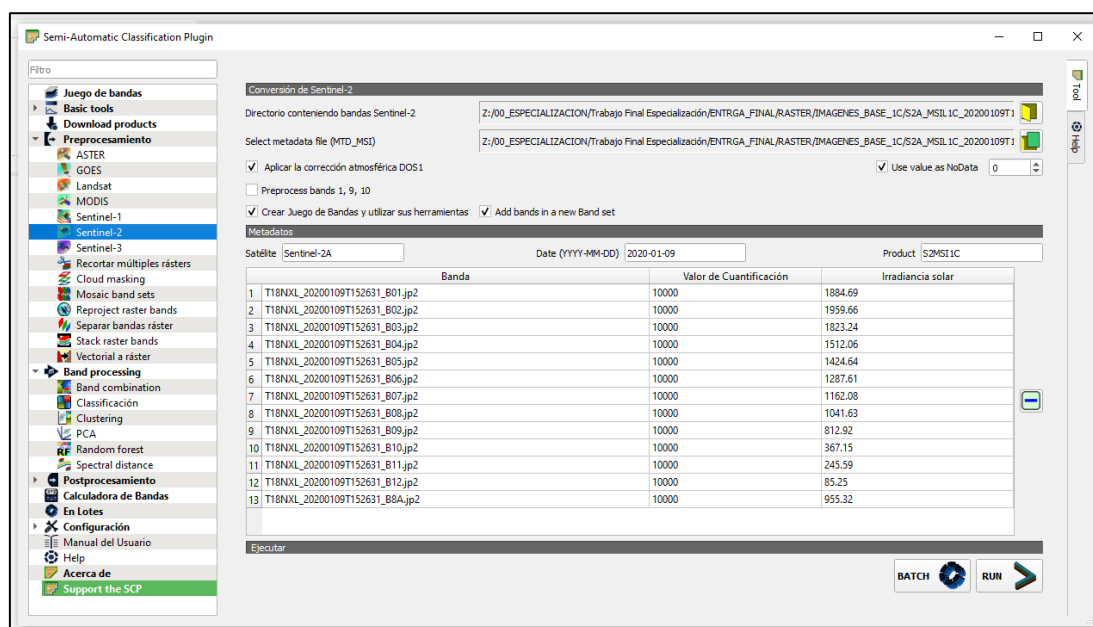


Figura 5. Configuración de ingreso de bandas complemento Semi-Automatic Classification para corrección Radiométrica DOS1

Una vez realizada la corrección radiométrica, podemos observar una mejora en la definición de cada banda, y como se muestra en la Figura 6. los rangos de valores de los pixeles han cambiado de 0 - 9745 (Niveles Digitales) a 0.0551 - 0.9326 (Valores en Reflectancia).

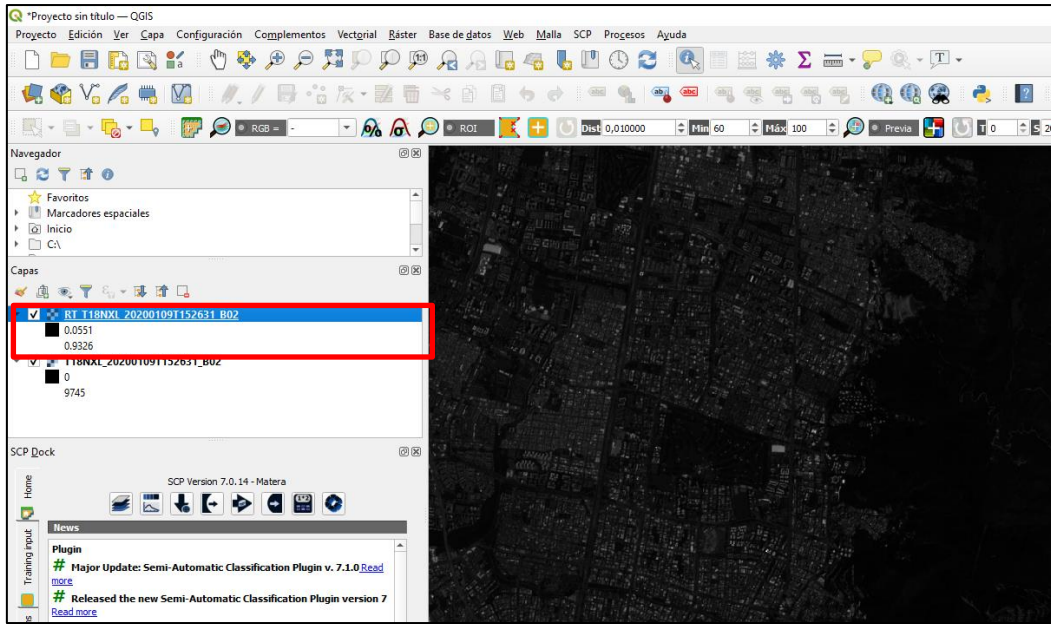


Figura 6. Cambio de Valores por píxel entre Niveles Digitales (ND) y Reflectancia (RT)

Una vez contamos con todas las bandas en valores de Reflectancia, procedemos a crear una única imagen multiespectral con las bandas: B2 – Azul, B 3 – Verde, B4 – Rojo, B5 - Vegetation Red Edge, B6 - Vegetation Red Edge, B6 - Vegetation Red Edge, B8 – NIR, B8A – NIR, B11 – SWIR y B 12 – SWIR, las cuales tienen las resoluciones espaciales entre 10 y 20 metros.

Las bandas: B1 - Coastal aerosol, B9 - Water vapour y B10 - SWIR – Cirrus, se excluyeron puesto que por su resolución espacial de 60 metros al momento de realizar la firma espectral puede generar ruido en el análisis.

Para realizar la unión de las 10 bandas del espectro que se utilizó la herramienta Juego de bandas del complemento Semi-Automatic Classification, donde se seleccionan las bandas anteriormente nombradas y estas compusieron la imagen multiespectral de donde se obtuvieron las firmas espectrales. Un aspecto a tener en cuenta es que las bandas son renombradas, por lo tanto, las bandas de la imagen multiespectral se relacionarán de la siguiente manera:

No. Banda Original	No. Banda Imagen Multiespectral	Longitud de Onda Central [micrómetros]
Banda 2 - Azul	Banda 1	0.490
Banda 3 - Verde	Banda 2	0.560
Banda 4 - Rojo	Banda 3	0.665
Banda 5 - Vegetation Red Edge	Banda 4	0.705
Banda 6 - Vegetation Red Edge	Banda 5	0.740
Banda 7 - Vegetation Red Edge	Banda 6	0.783

No. Banda Original	No. Banda Imagen Multiespectral	Longitud de Onda Central [micrómetros]
Banda 8 - NIR	Banda 7	0.842
Banda 8A - Vegetation Red Edge	Banda 8	0.865
Banda 11 - SWIR	Banda 9	1.610
Banda 12 - SWIR	Banda 10	2.190

Tabla 1. Identificación de longitudes de onda en las bandas de la imagen multiespectral.

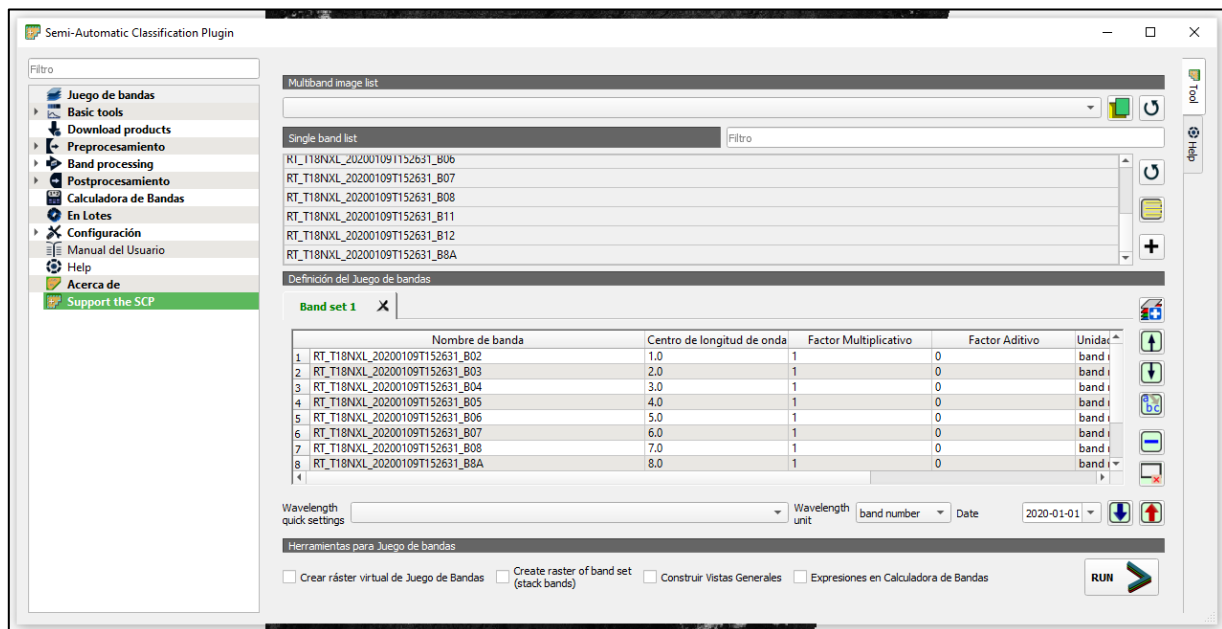


Figura 7. Creación de imagen multiespectral con la herramienta Juego de bandas del complemento Semi-Automatic Classification.

Para mayor información del funcionamiento del complemento Semi-Automatic Classification, se puede consultar el manual de usuario desde el sitio Web <https://fromgitors.blogspot.com/p/user-manual.html> donde describen los parámetros matemáticos y algoritmos de cada herramienta.

TOMA DE PUNTOS DE CONTROL

Debido a la emergencia sanitaria mundial por Covid 19 en el año en el que se desarrollo este estudio, para evitar un posible contagio al movilizarse por la ciudad, se tomó la decisión de tomar los puntos de control mediante información secundaria, a través de imágenes de alta resolución, con bade a sectores de la ciudad que por conocimiento propio del autor por experiencias laborales previas, se tenía reporte de la presencia de retamo espinoso. Para la identificación de los parches de retamo se usaron las siguientes imágenes:

- **Ortoimagen. Bogotá D.C. 2014**

- Entidad: La IDE de Bogotá
- Fecha de actualización del contenido: 08/08/2014
- Fuente: Mapas Bogotá
- Licencia: Restringida
- Fuente: <https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/ortoimagen-bogota-dc-2014>

- **Ortoimagen. Bogotá D.C. 2017**

- Entidad: La IDE de Bogotá
- Fecha de actualización del contenido: 31/12/2017
- Fuente: Fuerza Aérea Colombiana
- Licencia: CC BY 4.0
- Fuente: <https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/ortoimagen-bogota-dc-2017>

- **Imagen Satelital Google Earth 2020**

- Entidad: Google
- Fecha de actualización del contenido: 03/02/2020
- Fuente: Google
- Licencia: Libre
- Fuente: <http://www.google.cn/maps/vt?lyrs=s@189&gl=cn&x={x}&y={y}&z={z}>

La metodología usada para seleccionar los parches se basó en la revisión de puntos estratégicos donde se tenía conocimiento de la presencia de retamo espinoso para el año 2019. La primera verificación se realizaba con la ayuda de la Ortoimagen. Bogotá D.C. 2014, la cual cuenta con la mejor resolución espacial, una vez se identificaba claramente un parche, se procedía a validar su continuidad en el tiempo con la ayuda de la Ortoimagen. Bogotá D.C. 2017 y posteriormente con la imagen Satelital Google Earth 2020. Si se lograba confirmar que este parche había tenido una continuidad hasta el mes de febrero del año 2020 se procedía realizar una ficha con las características interpretadas de las tres imágenes (Ver Figura 8.), y además se creaba el punto de control en el centro del parche para posteriormente asociar este punto con un píxel de la imagen multiespectral Sentinel-2 que anteriormente habíamos creado. En total se lograron identificar 25 puntos que corresponden a las coordenadas siguientes:

Punto	Coordenadas Magna Colombia Bogotá	
	X	Y
PT_01	999732,31	992496,54
PT_02	999629,57	992388,62

Punto	Coordenadas Magna Colombia Bogotá	
	X	Y
PT_14	997846,59	991240,41
PT_15	999515,63	993226,15

Punto	Coordenadas Magna Colombia Bogotá	
	X	Y
PT_03	999561,67	992417,36
PT_04	999517,39	992434,08
PT_05	999525,07	992510,62
PT_06	999669,43	992360,18
PT_07	999502,34	992661,79
PT_08	999436,50	992702,84
PT_09	999468,98	992880,55
PT_10	999331,41	992936,86
PT_11	999147,18	991225,14
PT_12	998006,45	991199,79
PT_13	997931,31	990967,83

Punto	Coordenadas Magna Colombia Bogotá	
	X	Y
PT_16	999972,62	994243,13
PT_17	998016,26	994106,06
PT_18	997993,82	994072,34
PT_19	1002328,47	1001566,78
PT_20	1002480,34	1001535,26
PT_21	999100,24	991240,39
PT_22	999066,73	991259,45
PT_23	998156,79	991350,08
PT_24	998136,86	991310,20
PT_25	998066,16	991320,32

Tabla 2. Puntos de parches interpretados de retamo espinoso.

FICHA 1		
IMÁGENES:		
Ortoimagen. Bogotá D.C. 2014	Ortoimagen. Bogotá D.C. 2017	Imagen Google Earth 2020
		
1:4 000	1:4 000	1:4 000
<p>Descripción:</p> <p>En la Ortoimagen de 2014 podemos observar de manera detallada el parche de retamo espinoso que se encuentra en estado fenológico de floración, por esto se ve una mezcla de tonos verdes y amarillos de textura moteada.</p> <p>A pesar de que el servicio de la Ortoimagen de 2017 no permite hacer un mayor acercamiento se pudo evidenciar que el parche identificado en la imagen 2014 aun se encuentra presente para 2017</p> <p>Finalmente se valido que el parche identificado para 2014 y 2017 aun existía, por medio de una imagen satelital de la plataforma Google Earth, de fecha 03 de Febrero del 2020</p>		
COORDENADAS		
Coordenadas Magna Colombia Bogotá	X	999732,31
	Y	992496,54
OBSERVACIÓN		
Se puede observar que el parche posiblemente este asociado a pastos y rastrojos.		
<div> <div>FICHA_1</div> <div>Ficha_2</div> <div>Ficha_3</div> <div>Ficha_4</div> <div>Ficha_5</div> <div>Ficha_6</div> <div>Ficha_7</div> <div>Hoja8</div> <div>Hd</div> </div>		

Figura 8. Fichas de interpretación de parches para toma de puntos de control

USOS DEL COMPLEMENTO SEMI-AUTOMATIC CLASSIFICATION DE QGIS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LA FIRMA ESPECTRAL DE LOS PARCHES IDENTIFICADOS DE RETAMOS ESPINOSO

Una vez se identificaron los 25 puntos de control, por medio del complemento Semi-Automatic Classification de Qgis se crearon ROI's individuales para cada píxel asociado a un punto, Estos ROI's nos permiten observar la firma espectral de cada píxel seleccionado.

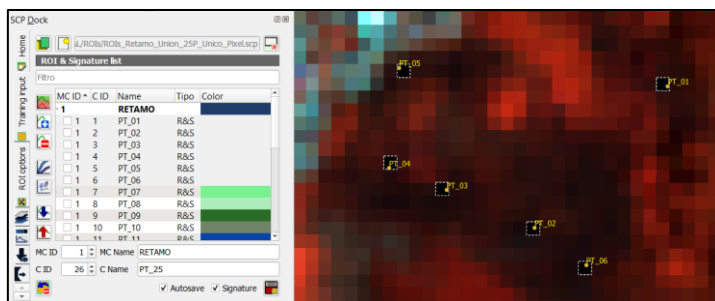


Figura 9. Selección de píxeles asociados a puntos de control, Creación de ROI's individuales.

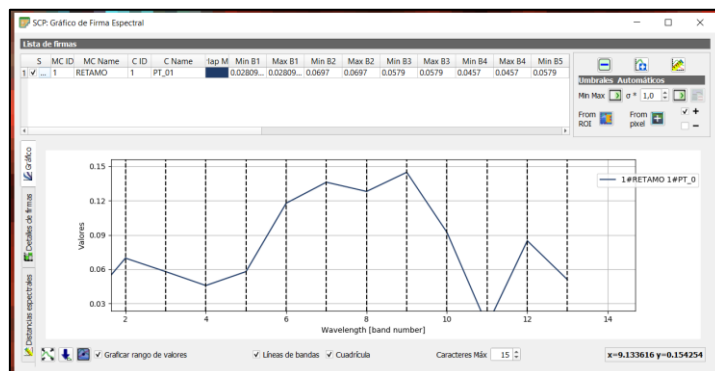


Figura 10. Ejemplo del grafico de la firma espectral del píxel asociado al punto de control Numero 01 (PT_01)

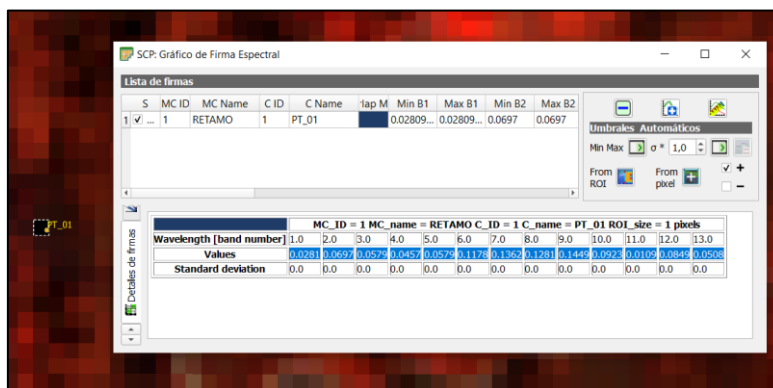


Figura 11. Ejemplo de datos de reflectancia por cada banda de la firma espectral del píxel asociado al punto de control Numero 01 (PT_01)

También esta herramienta nos permite realizar comparaciones entre firmas de varios puntos de control.

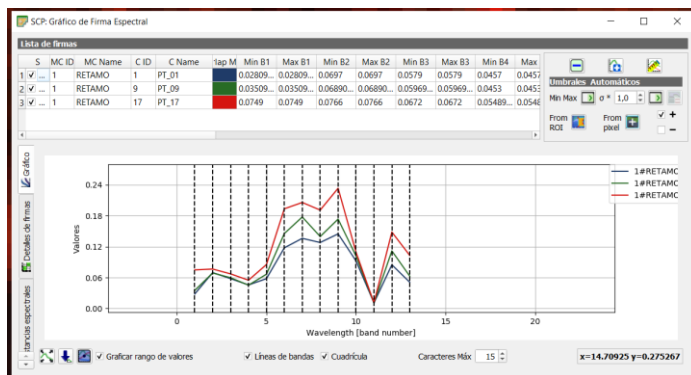


Figura 12. Ejemplo del grafico comparativo de las firmas espectrales de los pixeles asociados a los puntos de control PT_01, PT_09 y PT_17.

Posteriormente se realizó un análisis de varianza y desviación estándar entre los valores de reflectancia por banda de cada píxel asociado a un punto de control, en búsqueda de los pixeles que presentaran una mayor homogeneidad en sus valores de reflectancia y excluyendo los puntos que se podían considerar valores atípicos, para lograr reducir los valores de dispersión al mínimo y conseguir una única firma espectral. Como se observa en la tabla 3, de los 25 puntos iniciales se escogieron los 11 puntos que presentaban menor varianza ente los datos de reflectancia.

FINAL	Banda_1	Banda_2	Banda_3	Banda_4	Banda_5	Banda_6	Banda_7	Banda_8	Banda_9	Banda_10
Nombre	Azul	Verde	Rojo	IFC_705nm	IFC_740 nm	IFC_783 nm	IFC_842 nm	IFC_865 nm	IFL_1610 nm	IFL_2190 nm
Punto	Banda_2	Banda_3	Banda_4	Banda_5	Banda_6	Banda_7	Banda_8	Banda_8A	Banda_11	Banda_12
PT_03	0,0683	0,0557	0,0412	0,0618	0,1396	0,1536	0,1188	0,1669	0,1057	0,0735
PT_04	0,0692	0,0572	0,0459	0,0624	0,1366	0,1553	0,1256	0,1664	0,1056	0,0706
PT_05	0,0694	0,0592	0,0478	0,0639	0,1284	0,1431	0,1307	0,1504	0,1217	0,081
PT_07	0,0681	0,0562	0,0428	0,0561	0,1232	0,1473	0,1364	0,1509	0,0857	0,0506
PT_08	0,0692	0,0591	0,0468	0,0675	0,1472	0,1699	0,145	0,176	0,1055	0,0625
PT_09	0,0689	0,0597	0,0453	0,0665	0,1456	0,1777	0,1397	0,1736	0,1118	0,0626
PT_10	0,0683	0,0568	0,0443	0,0644	0,1377	0,1572	0,1287	0,1743	0,1013	0,0601
PT_11	0,0689	0,0616	0,0483	0,069	0,1312	0,1507	0,1601	0,1655	0,1346	0,0882
PT_12	0,0706	0,0617	0,0497	0,0686	0,1307	0,147	0,1698	0,1614	0,1076	0,0685
PT_16	0,0701	0,0625	0,0471	0,0722	0,1496	0,1728	0,1577	0,1881	0,1061	0,0571
PT_20	0,0674	0,057	0,0446	0,069	0,1273	0,1406	0,1125	0,1625	0,1029	0,0694

Varianza	0,00000	0,00001	0,00001	0,00002	0,00008	0,00015	0,00033	0,00012	0,00015	0,00012
Desviación estándar	0,00091	0,00239	0,00250	0,00446	0,00876	0,01242	0,01803	0,01101	0,01224	0,01076
PROMEDIO	0,06895	0,05879	0,04580	0,06558	0,13610	0,15593	0,13864	0,16691	0,10805	0,06765

Tabla 3. Análisis de Varianza y Desviación estándar para la selección de los pixeles asociados a puntos de control.

Finalmente, con estos 11 puntos se procedió a crear un único ROI, el cual al unir los valores de reflectancia calculo una única firma espectral.



Figura 13. Gráfico firma espectral asociada a retamo espinoso, con umbral de desviación estándar por cada banda del espectro.

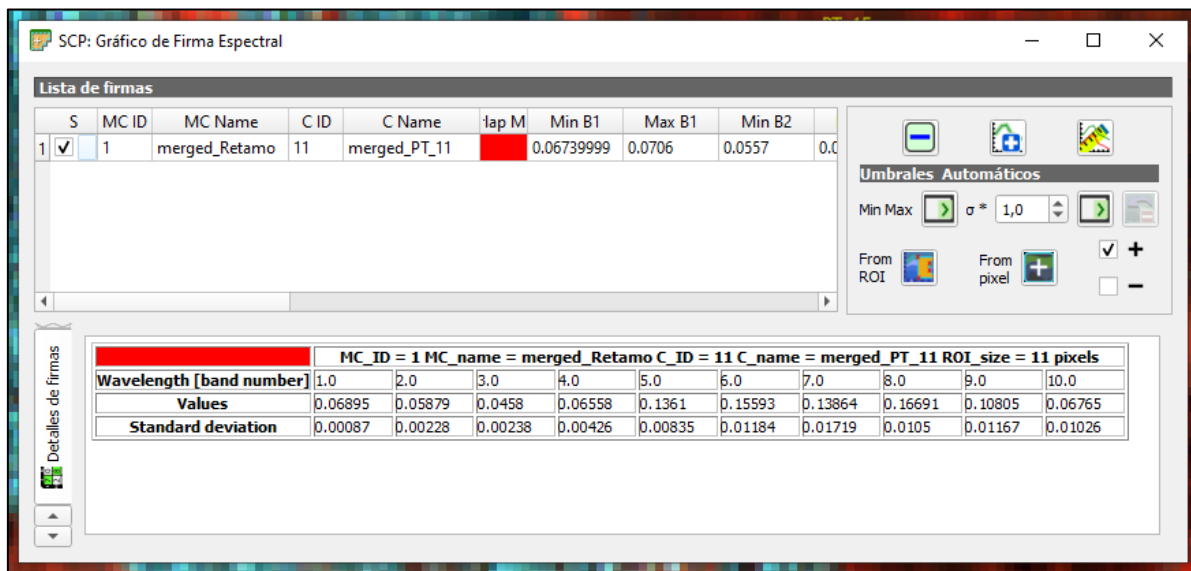


Figura 14. Valores firma espectral asociada a retamo espinoso, con umbral de desviación estándar por cada banda del espectro.

USOS DEL COMPLEMENTO SEMI-AUTOMATIC CLASSIFICATION DE QGIS PARA LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE LA IMAGEN SENTINEL-2 DEL ÁREA DE ESTUDIO A PARTIR DE LA FIRMA ESPECTRAL DESARROLLADA.

Una vez se cuenta con la firma espectral para este caso denominada “merged_PT_11” se usó la herramienta “Clasificación” que se encuentra en la pestaña de Procesamiento de bandas del complemento Semi-Automatic Classification de Qgis. En esta herramienta contamos con tres algoritmos de clasificación los cuales son:

Distancia mínima: calcula la distancia Euclídea $d(x, y)$ entre las firmas espectrales de los píxeles de la imagen y las firmas espectrales de entrenamiento. (Congedo, 2020)

Máxima Probabilidad: calcula las distribuciones de probabilidad para las clases, relacionado al teorema de Bayes, estimando si un píxel pertenece a una clase de cobertura. En particular, las probabilidades de distribución de las clases son asumidas de la forma de modelos normales multivariados (Richards & Jia, 2006). Para utilizar este algoritmo, se requiere un número lo suficientemente alto de píxeles para cada área de entrenamiento, lo cual permite el cálculo de la matriz de covarianza. (Congedo, 2020)

Mapecto del Angulo Espectral: calcula el ángulo espectral entre las firmas espectrales de los píxeles de la imagen y las firmas espectrales de entrenamiento. El Mapecto de Ángulo Espectral es ampliamente utilizado, especialmente con imágenes hiperespectrales.

La Clasificación por Firmas de Cobertura del Suelo está disponible en SCP (mira Land Cover Signature Classification). Esta clasificación permite la definición de umbrales espectrales para cada firma de entrada (un valor mínimo y un valor máximo para cada banda). Los umbrales de cada firma de entrenamiento definen la región espectral perteneciente a cada clase de cobertura del suelo. Para los análisis realizados se uso el umbral LCS con $\sigma = 1.0$

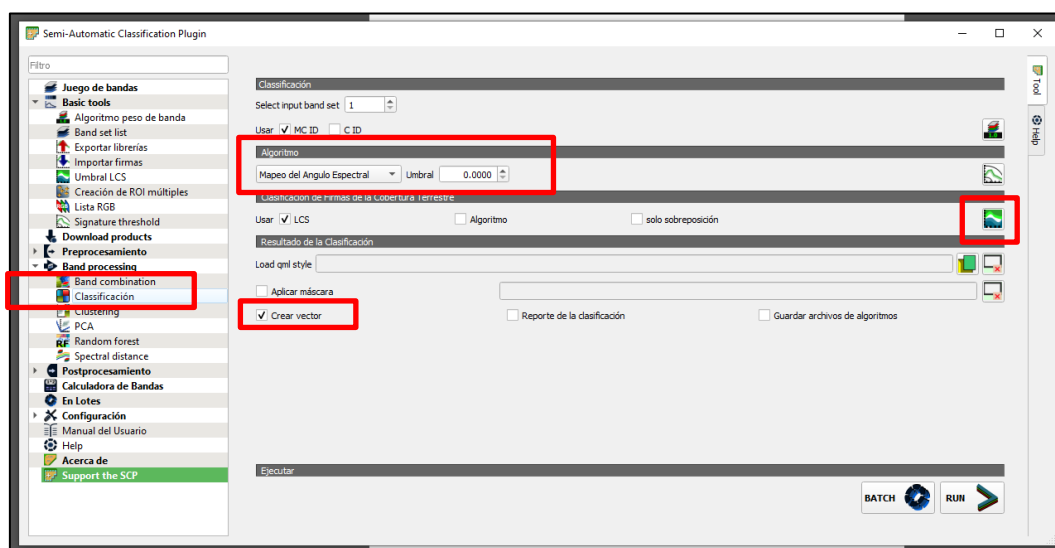


Figura 15. Herramienta de clasificación supervisada

Para mayor información del funcionamiento del complemento Semi-Automatic Classification, se puede consultar el manual de usuario desde el sitio Web <https://fromgistors.blogspot.com/p/user-manual.html> donde describen los parámetros matemáticos y algoritmos de cada herramienta.

2. RESULTADOS Y DISCUSIONES

FIRMA ESPECTRAL DESARROLLADA

Como resultado principal tenemos la firma espectral desarrollada para la identificación de parches de Retamo espinoso (*Ulex euripeus*) en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá, a partir de imágenes gratuitas Sentinel-2 y el Software libre de código abierto Qgis.

Esta firma fue generada a partir de las bandas de la imagen Sentinel-2 que contaban con una resolución espacial entre 10 y 20 metros, puesto que las bandas de resolución espacial de 60 metros por la cantidad de objetos que puede contener en un píxel, al determinar el valor medio digital de este, puede generar mucho ruido en comparación con píxeles de menor tamaño.

Debido a la emergencia sanitaria mundial por Covid 19 en el año en el que se desarrolló este estudio, los puntos de control fueron tomados a partir de las imágenes de alta resolución: Ortoimagen. Bogotá D.C. 2014, Ortoimagen. Bogotá D.C. 2017 e Imagen Satelital Google Earth 2020. La metodología en general consistió identificar los parches de retamo mas evidentes en la imagen 2014 la cual es la que cuenta con mayor resolución espacial, y ver la continuidad de la existencia de este parche en el tiempo, usando las imágenes 2017 y 2018. Una vez se identificaba claramente un parche que había permanecido hasta febrero del 2020 este se identificaba con un punto coordenado. En total se identificaron con claridad 25 parches.

Estos 25 puntos de control posteriormente fueron asociados a un píxel individual de la imagen satelital Sentinel-2 del 09 de enero del 2020, pero debido a que la zona de estudio es montañosa, la incidencia de la radiación solar no es igual en toda el área de estudio, por lo cual, los parches de retamo identificados pueden variar sus niveles de reflectancia, lo que genera que la desviación estándar fuera muy alta, como se muestra en la siguiente figura.

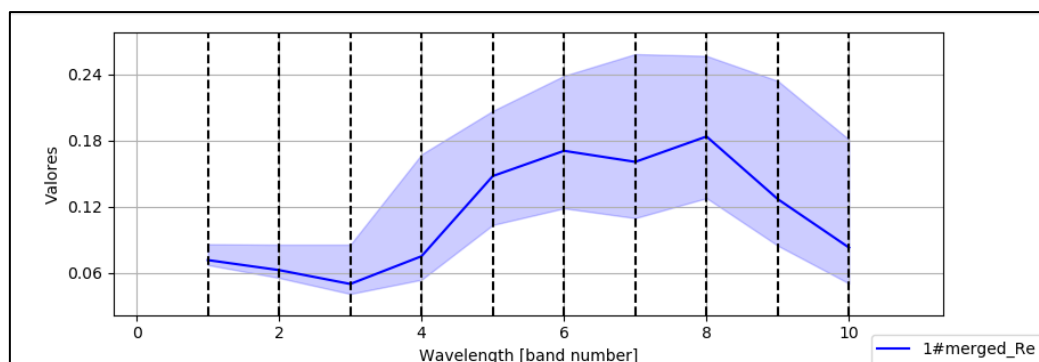


Figura 16. Firma espectral generada a partir de los 25 puntos de control. (La línea azul representa la firma espectral promedio y en Azul claro se representa el umbral de posibilidad dado por la desviación estándar de cada banda)

Debido a que la desviación estándar era muy alta, al usar esta firma para la clasificación supervisada, no se lograba diferenciar los parches de Retamo espinoso de otras coberturas vegetales como bosques naturales, bosque plantados, vegetación herbácea o arbustiva, entre otras. Por tal motivo se realizó una depuración de los puntos de control, eliminando aquellos que presentaban una mayor desviación estándar entendiéndolos como puntos atípicos. Como resultado de esta depuración se obtuvieron 11 puntos que contaban con el 91.65 % de similitud en sus valores de reflectancia.

En la Figura 17 podemos apreciar como el umbral de posibilidad es reducido, puesto que los puntos ahora son más homogéneos en sus valores de reflectancia en cada banda del espectro. Y en la figura 18 encontramos la comparación gráfica del comportamiento de la firma tomada con 25 puntos y la firma depurada con 11 puntos.

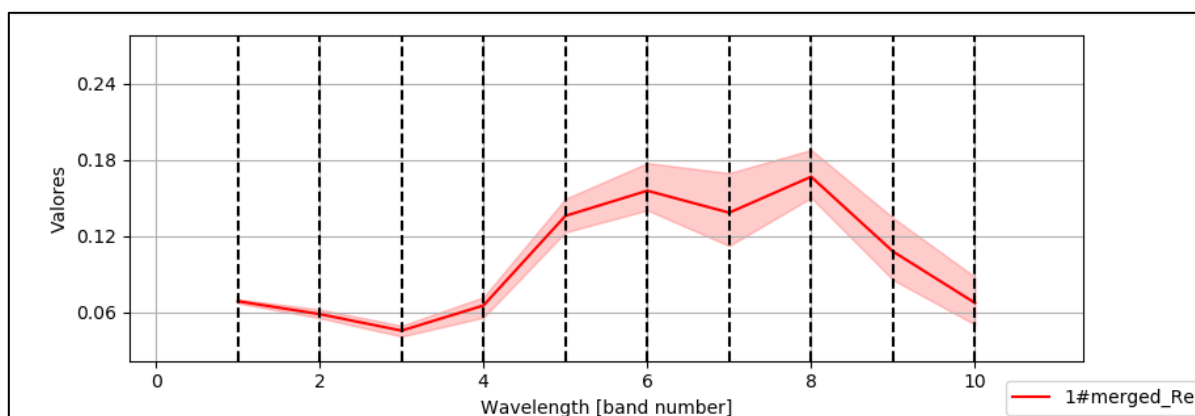


Figura 17. Firma espectral generada a partir de los 11 puntos de control que presentaban menor desviación estándar. (La línea roja representa la firma espectral promedio y en rojo claro se representa el umbral de posibilidad dado por la desviación estándar de cada banda)

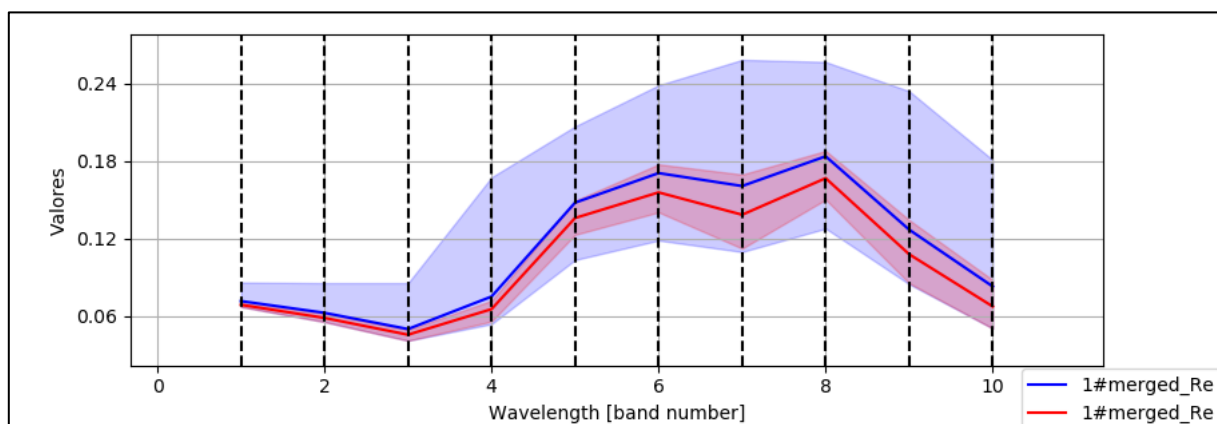


Figura 18. Comparación firmas espectrales

Como resultado final obtuvimos la siguiente firma espectral en valores de reflectancia:

No. Banda Original	No. Banda Imagen Multiespectral	Longitud de Onda Central [micrómetros]	Valor de Reflectancia	Desviación estándar
Banda 2 - Azul	Banda 1	0.490	0.06895	0.00087
Banda 3 - Verde	Banda 2	0.560	0.05879	0.00228
Banda 4 - Rojo	Banda 3	0.665	0.0458	0.00238
Banda 5 - Vegetation Red Edge	Banda 4	0.705	0.06558	0.00426
Banda 6 - Vegetation Red Edge	Banda 5	0.740	0.1361	0.00835
Banda 7 - Vegetation Red Edge	Banda 6	0.783	0.15593	0.01184
Banda 8 - NIR	Banda 7	0.842	0.13864	0.01719
Banda 8A - Vegetation Red Edge	Banda 8	0.865	0.16691	0.0105
Banda 11 - SWIR	Banda 9	1.610	0.10805	0.01167
Banda 12 - SWIR	Banda 10	2.190	0.06765	0.01026

Tabla 4. Resultados firma espectral en valores de reflectancia.

CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE LA IMAGEN SENTINEL-2

En primera instancia se realizó un recorte a la imagen multiespectral creada a partir de las bandas 10 bandas ajustadas de la imagen S2A_MSIL1C_20200109T152631_N0208_R025_T18NXL_20200109T185317, con el área de la zona de estudio correspondiente a las localidades donde se encuentran ubicados los cerros orientales de la Ciudad de Bogotá (Usaquén, Chapinero, Santa Fe, Candelaria, San Cristóbal y Usme).

Una vez tenemos la imagen recortada de nuestra área de estudio y la firma espectral desarrollada para la identificación de retamo espinoso, se procedió a usar la herramienta “Clasificación” que se encuentra en la pestaña de Procesamiento de bandas del complemento Semi-Automatic Classification de Qgis. Donde se obtuvieron como resultado una serie de polígonos donde se estima exista presencia de retamo espinoso.

En la Figura 19 encontramos los resultados de la clasificación supervisada, como podemos observar en el apartado B. La mayor parte de los 11 puntos de control usados

han quedado dentro de los polígonos identificados luego de ejecutar la herramienta del complemento de Qgis. Por otra parte, en el Apartado C. apreciamos como a pesar de que los puntos PT_01, PT_02 y PT_06 no fueron incluidos en la firma espectral y que tampoco fueron identificados al ejecutar la clasificación, se observa que alrededor de estos puntos se identificaron algunos parches de Retamo espinos, lo que nos permite inferir que firma espectral desarrollada ha logrado identificar áreas con presencia de la especie de estudio.

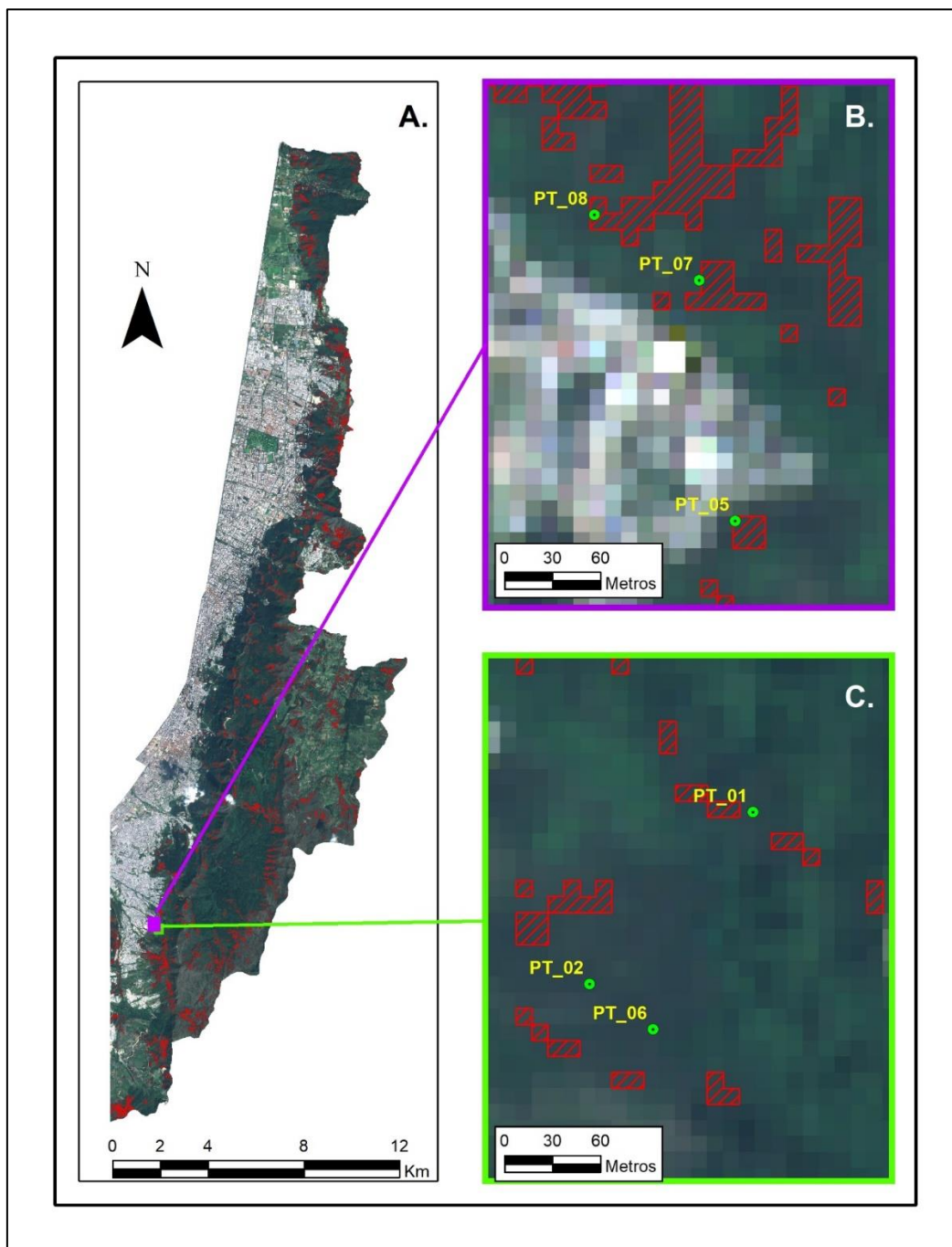


Figura 19. Análisis de resultados clasificación supervisada.

Como parte de los objetivos de este estudio se quería saber cual es la unidad mínima de área que se podía identificar por medio de los insumos y metodología usados, teniendo como resultado que:

El tamaño mínimo de parche identificado fue de 100,05 Metros cuadrados, este tamaño esta dado principalmente por la resolución espacial de la imagen multiespectral que ha quedado unificada a 10 m x 10 m. Por otra parte, el tamaño máximo de parche identificado fue de 11706,33 Metros cuadrados, mientras que el promedio de los parches identificados, correspondió a 243.39 Metros Cuadrados.

VALIDACIÓN DE LA FIRMA DESARROLLADA

Finalmente, a modo de validación del estudio se realiza una comparación de los resultados obtenidos de la clasificación supervisada de la imagen Sentinel-2 a partir de la firma digital desarrollada, con un Shape oficial de identificación de parches de retamo espinoso en las áreas urbanas y rurales de Bogotá D.C., elaborado por la secretaria distrital de ambiente y que cual se encuentra disponible en la página de datos abiertos Bogotá desde el Link https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/1d63dc7b-ffd5-40b5-96a2-41d5f6bbbeb42?_external=True. A pesar de que no fue posible encontrar un documento o metadato completo sobre cómo fue elaborado este shape, en la página de descarga podemos encontrar un metadato básico de donde se pudo extraer la siguiente información:

Autor: Secretaría Distrital de Ambiente - SDA

Fecha creación del metadato: 2019-12-03

Fecha actualización metadato: 2020-01-13

Reporte de la calidad: El producto cumple con los requerimientos exigidos por la SDA en cuanto información geográfica ambiental.

Responsable del Metadato: Secretaría Distrital de Ambiente

La validación de los resultados se realizó verificando la cantidad de área que tuviera coincidencia entre el análisis realizado con la firma espectral y el Shape de Retamo Espinoso desarrollado por la Secretaria Distrital de Ambiente - SDA de Bogotá.

	ANÁLISIS FIRMA ESPECTRAL	% ÁREA FE	SHAPE SDA	% ÁREA SDA
ÁREA CON PRESENCIA DE RETAMO ESPINOSO	188,27	1,34%	138,23	0,98%
ÁREA SIN PRESENCIA DE RETAMO ESPINOSO	13886,04	98,66%	13936,07	99,02%
ÁREA TOTAL CERROS ORIENTALES	14074,31	100%	14074,31	100%
ÁREA QUE COINCIDE ANALÍS FIRMA Y SDA	3,03			

Tabla 5. Comparación de áreas y porcentaje de área entre los polígonos del resultado alcanzado con el uso de la firma digital desarrollada y los polígonos del Shape de retamo espinoso desarrollado por la Secretaria distrital de ambiente de Bogotá.

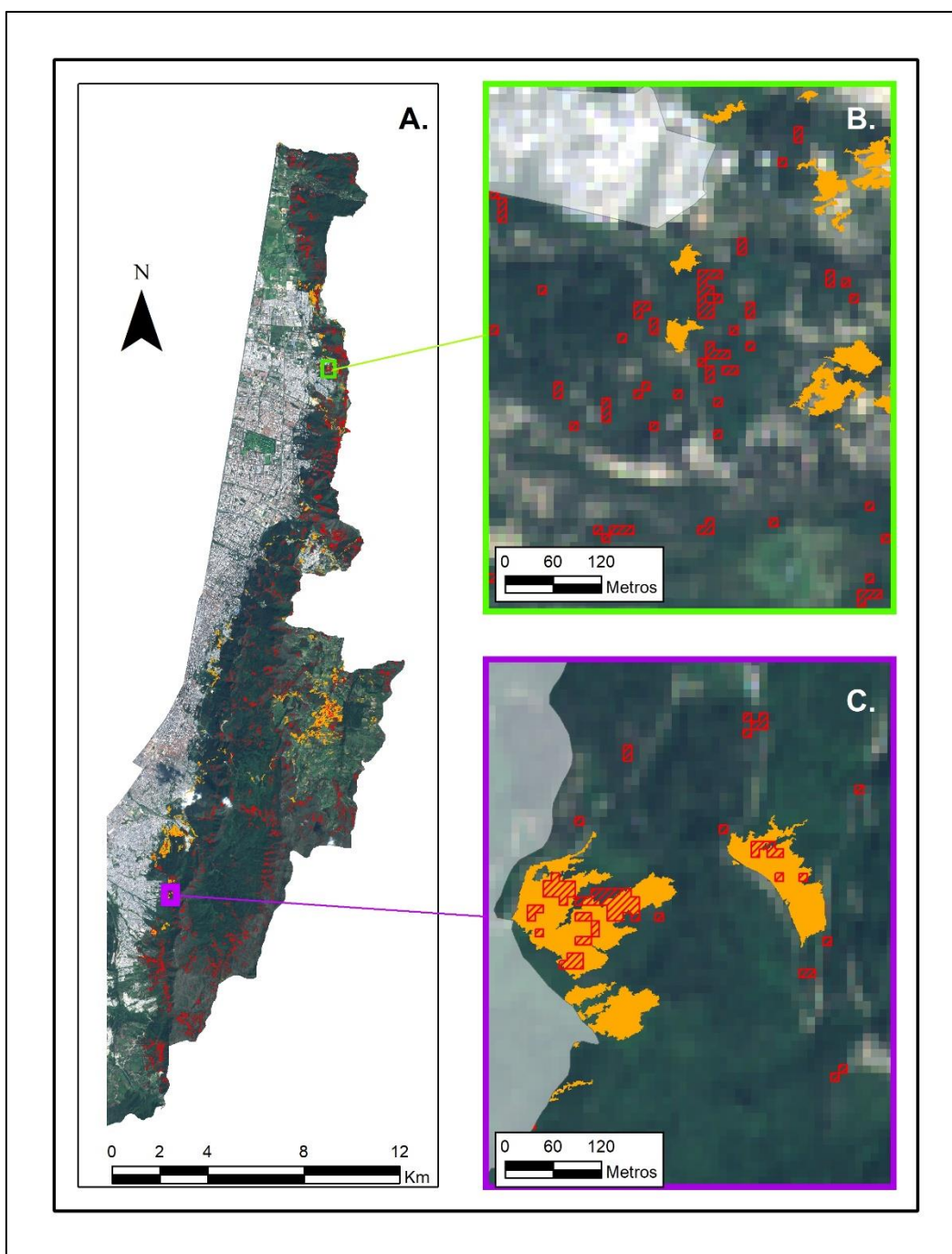


Figura 20. Análisis Comparativo entre área Reportada por la SDA (Color Naranja) y El área calculada por medio de la firma espectral desarrollada.

A pesar de que la coincidencia entre las dos capas solo fue de 3,03 hectáreas como se aprecia en la tabla 5, se observa en la en la Figura 20 apartado B., que muchos de los polígonos generados a partir de la firma espectral desarrollada no se superponen

en su totalidad a los polígonos reportados por la SDA, pero se evidencia una gran aproximación a estos. Por otra parte, en el apartado A. evidenciamos que a groso modo existe una coincidencia general en la distribución de los parches de retamo a lo largo de los cerros orientales y además en el apartado C. podemos observar cómo varios pligonos coinciden con los parches identificados por la SDA.

3. CONCLUSIONES

- Por medio del desarrollo de una firma espectral teniendo como insumo imágenes satelitales Sentinel-2, se logró realizar una aproximación de la distribución espacial de Retamo espinoso (*Ulex europeus*) presente en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá, debido a que esta especie vegetal presenta un comportamiento de agrupación en parches densos que permite su identificación.
- El resultado de la firma espectral arroja que el comportamiento de la reflectancia para esta especie presenta los mayores valores en las longitudes de onda correspondientes al infrarrojo cercano, que para imágenes Sentinel-2 se encuentran entre las bandas 4 y 8A, pero que a su vez muestra los picos mas representativos en las bandas 7 (IFC-783 nm) y en la banda 8A (IFC-865 nm).
- La unidad mínima en la cual se puede identificar un parche de Retamo espinoso mediante el uso de imágenes sentinel-2 es de 100 metros cuadrados, pese a que 6 de las 10 bandas implementadas para el desarrollo de la firma espectral tenían una resolución espacial de 20 X 20 metros (400 metros cuadrados).
- Se encontró que el mayor inconveniente al momento de desarrollar la firma espectral para la identificación de parches de *Ulex europeus* es su comportamiento asociado a otras coberturas, principalmente pastizales y otros arbustales, esto generó que los pixeles adquieran un valor promedio de reflectancia para los 100 metros cuadrados correspondientes a la resolución espacial mínima en las imágenes Sentinel-2, lo que a su vez generó que al realizar la clasificación de la imagen, se incluyeran parches de otras especies vegetales.
- La validación realizada con base al shape de Retamo espinoso elaborado por la Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá para el año 2019 donde se evaluó la cantidad de área que se sobreponía frente a los polígonos generados a partir de la firma espectral y la clasificación de la imagen satelital sentinel-2, arroja como resultado que a pesar de que los polígonos no se sobreponen totalmente, si existe un relación en cuanto a la distribución de estos, por tal motivo podemos inferir que la firma espectral desarrollada y la metodología utilizada no garantiza en un 100 % la existencia de un parche de retamo espinoso, pero si nos ayuda a tener una aproximación de las áreas que tienen una alta probabilidad de tener presente dicha especie invasora.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar Arias, H., Carranza Solano, M., Foster Burr, L., & Ortega Rivera, M. (2016). *Desarrollo de una firma espectral para la identificación de cultivos de piña a través de sensores remotos e in situ en Costa Rica. (Informe II-Final de Proyecto)*. San José: PRIAS-CeNAT.

Ángel López, Y. B. (2012). *Metodología para identificar cultivos de coca mediante análisis de parámetros red edge y espectroscopia de imágenes (Tesis de Maestría)*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Araque Torres, L. (2009). Caracterización de firma espectral a partir de sensores remotos para el manejo de sanidad vegetal en el cultivo de palma de aceite. *PALMAS*, 30(3), 63-79.

Congedo, L. (2020). *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation, Versión 6.4.0.2*. Roma.

Corrales Andino, R. E., & Ochoa López, V. L. (2016). Cálculo de reflectancia en imágenes Landsat OLI-8, sobre la región central de Honduras, mediante software libre SEXTANTE. *REVISTA CIENCIAS ESPACIALES*, 9(1), 81-96.

European Space Agency – ESA. (03 de 11 de 2020). *ESA Sentinel Online Sentinel-2 Products-Algorithms*. Obtenido de ESA Sentinel Online Web Site:
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/products-algorithms>

Labrador García, M., Évora Brondo, J. A., & Arbelo Pérez, M. (2012). *Satélites de teledetección para la gestión del territorio*. Canarias: Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias.

López Calle, M. I., & Gaitán Rojas, D. J. (2018). *Análisis multitemporal de la especie vegetal invasora Retamo espinoso (Ulex europaeus) en el embalse la regadera, zona rural de la localidad de Usme, a partir de Imágenes satelitales Sentinel 2 y Landsat 8 mediante el uso de algoritmos de clasificación*. Bogotá.

Ocampo Zuleta, K., & Solorza Bejarano, J. (2017). Banco de semillas de retamo espinoso *Ulex europaeus* L. en bordes del matorral invasor en un ecosistema zonal de bosque altoandino, Colombia. *BIOTA Colombiana*, 18.

Sarría, F. A. (2005). *Sistemas de Información Geográfica*. Murcia.

Souza Martins, V., Faria Barbosa, C. C., Sander de Carvalho, L. A., Ferreira Jorge, D. S., de Lucia Lobo, F., & Moraes Novo, E. M. (2017). Assessment of Atmospheric Correction Methods for Sentinel-2 MSI Images Applied to Amazon Floodplain Lakes. *Remote Sensing*, 1-23.